中国生态农业学报 2016 年 9 月 第 24 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2016, 24(9): 1231−1238

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160319

近地层臭氧浓度增高对稻米品质的影响: FACE 研究*

沈士博[1] 张顶鹤[1] 杨开放[1] 王云霞[2] 朱建国[3] 杨连新[1**] 王余龙[1]

(1. 扬州大学/江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心 扬州 225009; 2. 扬州大学环境科学与工程学院 扬州 225009; 3. 中国科学院南京土壤研究所/土壤与可持续农业国家重点实验室 南京 210008)

摘 要 利用稻田开放式空气中臭氧浓度增加(FACE, Free Air gas Concentration Enrichment)平台, 以常规粳稻'武粳 15'和杂交粳稻'陵风优 18'为供试材料, 设置大气背景臭氧浓度(Ambient)和高臭氧浓度(比 Ambient 增高 21%, 模拟 21 世纪中叶臭氧浓度)两个水平, 研究臭氧胁迫对大田生长水稻成熟期稻米加工、外观、蒸煮/食味和营养品质的影响及其种间差异。结果表明, 近地层臭氧浓度增高使稻米糙米率、精米率和整精米率均不同程度下降, 其中精米率降幅达显著水平。与 Ambient 相比, 臭氧胁迫使两品种稻米垩白米率、垩白大小和垩白度平均分别增加 15.0%(P=0.10)、42.0%(P<0.05)和 60.5%(P<0.05)。臭氧胁迫使稻米胶稠度平均降低 7.1% (P<0.05), 但对两品种稻米直链淀粉和糊化温度均无显著影响。稻米 RVA 谱测定结果显示, 臭氧胁迫对稻米最高黏度值、崩解值、冷胶黏度值、消减值和回复值均无显著影响。臭氧胁迫使两品种稻米蛋白质浓度呈增加趋势, 但均未达显著水平。方差分析表明, 多数情况下, 两品种间稻米诸品质性状存在显著差异, 但品种与臭氧的互作对所有测定指标均无显著影响, 说明两品种稻米品质对臭氧胁迫的响应无明显差异。本试验在开放稻田条件下运行, 适度臭氧胁迫使稻米垩白明显增加, 胶稠度显著下降, 但对其他米质指标影响较小, 两品种趋势一致。

关键词 水稻 臭氧胁迫 FACE 加工品质 外观品质 蒸煮/食味品质 营养品质
中图分类号: S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)09-1231-08

Effect of elevated surface layer ozone concentration on grain quality of two rice cultivars — A FACE study*

SHEN Shibo[1], ZHANG Dinghe[1], YANG Kaifang[1], WANG Yunxia[2], ZHU Jianguo[3], YANG Lianxin[1**], WANG Yulong[1]

(1. Yangzhou University / Key Laboratory of Crop Genetics & Physiology of Jiangsu Province / Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture / Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Tropospheric ozone has been assumed to be the most phytotoxic air pollutant, which has created a severe concern for environmental pollution due to its negative impact on crop production. However, high ozone concentration also affects crop quality, which has so far not been treated in sufficient detail. Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important food crops in the world, providing a significant proportion of human daily dietary needs. The accurate assessment of the impact of elevated concentration of surface layer ozone on rice quality is critical for reducing uncertainties in predicting future global food

* 国家自然科学基金面上项目(31471437, 31371563)、中国科学院知识创新方向项目(KZCX2-EW-414)和江苏高校优势学科建设工程项目资助
** 通讯作者: 杨连新, 主要从事作物栽培、生理和生态方面的研究。E-mail: lxyang@yzu.edu.cn
沈士博, 主要从事大气变化与水稻响应方面的研究。E-mail: 513798161@qq.com
收稿日期: 2016−04−05 接受日期: 2016−04−27
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31471437, 31371563), the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KZCX2-EW-414) and the Priority Academic Development Program of Jiangsu Higher Education Institutions.
** Corresponding author, E-mail: lxyang@yzu.edu.cn
Received Apr. 5, 2016; accepted Apr. 27, 2016

security. Using a Free-Air gas Concentration Enrichment (FACE) facility in Xiaoji Town (which is in Jiangdu County, Jiangsu Province, China), we conducted a field experiment to investigate the impacts of ozone stress on rice grain quality, including processing quality, appearance quality, cooking/eating quality and nutritional quality. Two rice cultivars (a conventional japonica cultivar 'Wujing 15' and a hybrid japonica cultivar 'Lingfengyou 18') were exposed to either ambient or elevated ozone concentration (ca. 21% above ambient values) from tillering to harvest. The results showed that elevated ozone resulted in a small decrease in brown rice percentage, milled rice percentage and head rice percentage, with the effect on milled rice percentage significant at the 0.05 level. Averaged across the two cultivars, elevated ozone concentration increased chalky grain percentage, area of chalkiness and degree of chalkiness by 15.0% (P = 0.10), 42.0% (P < 0.05) and 60.5% (P < 0.05), respectively. On average, elevated ozone concentration decreased gel consistency by 7.1% (P < 0.05), while no significant effect was observed on amylose concentration and gelatinization temperature for both cultivars. Measurements of RVA profile (Rapid Visco Analyser) indicated no significant changes in maximum viscosity, breakdown, cold viscosity, setback, and return due to elevated ozone. Elevated ozone concentration caused a non-significant increase in grain protein concentration for both cultivars. Analysis of variance indicated that in most cases, the effect of cultivar differences was significant. However, the interaction of ozone with cultivar was not detected for the tested traits of grain quality, suggesting that the response to ozone stress was similar for the two rice cultivars. The open-air field experiment suggested that moderate high ozone environment greatly increased grain chalkiness and significantly decreased gel consistency, but had little effect on other quality parameters of both cultivars.
Keywords Rice; Ozone stress; FACE (Free Air gas Concentration Enrichment); Processing quality; Appearance quality; Cooking/eating quality; Nutritional quality

在许多亚洲国家，近年来快速的经济发展使得空气污染物氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOC)排放增加，这些臭氧前体物在高温和强辐照条件下通过光化学反应转化为臭氧，导致许多国家地表(近地层或对流层)臭氧浓度迅速上升，特别是人口大国中国和印度[1−2]。除了人口密度高和经济发展活跃之外，这些地区所处的热带和亚热带气候条件也有利于臭氧的形成[3−5]。最新模型研究表明，即使采取严格的污染控制(使排放水平控制在 2006 年)，21 世纪中叶我国南部地区的地表臭氧浓度还会增加[4]。据预测，在未来的 40 年里，东南亚地区地表平均臭氧浓度将比现在高 25 $nL \cdot L^{-1}$[1]。臭氧是强氧化剂，地表不断增加的臭氧浓度已经对主要粮食作物的生产力造成伤害，未来这种影响将更大[6−9]。

水稻(*Oryza sativa*)是世界上最重要的作物之一，为全球半数以上人口提供热量和营养[10]，同时也是对臭氧胁迫响应敏感的作物[6−7]。随着人口快速增长，耕地面积和质量的下降，未来几十年世界对稻米、特别是优质稻米的需求将持续增加[9,11]。需求的激增对稻作生产提出了很大的挑战，而地表臭氧浓度增加使这一挑战变得更为严峻，因为稻作主产区通常也是地表臭氧浓度较高的地区。近年来国内外开展了大量有关臭氧胁迫对水稻影响的研究，但多数集中在生长发育和产量形成方面，很少涉及稻米品质的响应[7,9,12]，且已有文献通常只涉及少数品质指标(主要是营养品质)的响应[13−16]，鲜见品质综合性状的报道[17−18]，小麦(*Triticum aestivum*)亦有类似情形[19]。稻米品质是一个多指标的综合概念，一般包括加工、外观、蒸煮/食味和营养品质等方面。Wang 等[17−18]首次系统报道了臭氧胁迫对杂交籼稻'汕优 63'稻米综合品质的影响，结果发现，臭氧浓度增加 25%使该品种稻米外观和蒸煮/食用品质明显变劣[17]，但在高 CO_2 浓度环境下这种变化明显减小[18]。这说明稻米品质对臭氧的响应还受外界环境条件的影响，但是否因供试品种而异，目前尚鲜见报道。

与气室相比，FACE(Free Air gas Concentration Enrichment，开放式空气中微量气体浓度增高)试验使用当地标准的作物管理技术，在空气自由流动的农田条件下对作物进行研究，具有试验空间大且更接近于自然农田环境等特点[20]。2007 年我国建立了世界上第 1 个稻/麦轮作臭氧 FACE 平台[21]，这为研究臭氧与品种[22−23]和栽培因子[16,23−25]的互作效应提供了契机。本文利用这一平台，模拟 21 世纪中叶的近地层臭氧浓度，以常规粳稻'武粳 15'和杂交粳稻'陵风优 18'为供试材料，研究臭氧胁迫对稻米加工、外观、蒸煮/食味和营养品质的影响及其种间差异，以期为高臭氧浓度环境下稻作生产适应策略的制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验平台

本试验于 2009 年在中国水稻臭氧 FACE 研究技术平台上进行。该平台建于江苏省江都市小纪镇(119°42′0″E, 32°35′5″N)良种场试验田中。试验田土

壤类型为青泥土，年均降水量 918~978 mm，年均蒸发量大于 1 100 mm，年平均温度 14~16 ℃，年日照时数大于 2 000 h，年平均无霜期 220 d 左右。耕作方式为水稻–冬小麦轮作。土壤理化性质为：有机质含量 18.39 $g\cdot kg^{-1}$，全氮 1.51 $g\cdot kg^{-1}$，全磷 0.63 $g\cdot kg^{-1}$，全钾 14.02 $g\cdot kg^{-1}$，pH 7.9，小于 0.002 mm 黏粒含量 13.6%，容重 1.16 $g\cdot cm^{-3}$[26]。

平台共有 3 个 FACE 圈和 3 个对照(Ambient)圈。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 90 m，以减少臭氧释放对其他圈的影响。FACE 圈设计为直径 12.5 m 的正八角形，通过 FACE 圈周围的管道向 FACE 圈中心喷射纯臭氧气体，利用计算机网络对平台的臭氧浓度进行检测和控制，根据大气中的臭氧浓度、风向、风速、作物冠层高度的臭氧浓度及昼夜变化等因素自动调节臭氧的释放速度及方向，使水稻全生育期 FACE 圈内臭氧浓度保持比大气中臭氧浓度高 50%。当对照圈臭氧浓度低于 20 $nL\cdot L^{-1}$、下雨和露水等造成叶片湿润以及校正臭氧分析仪、检修设备等的时候暂停放气(即 8 月 14 日和 9 月 25 日暂停放气)。本试验臭氧处理从 7 月 1 日开始，10 月 15 日结束，其中有效控制天数为 50 d，占总控制天数的 48%，占总生育期天数的 42%。因此水稻生长季 FACE 圈内实际平均臭氧浓度比对照圈臭氧浓度只增加 21%，穗分化(7 月 18 日)至成熟期实际增加臭氧浓度也为 21%(图 1)。对照田块没有安装 FACE 管道，其余环境条件与自然状态一致。处理时间为 7 月 1 日(分蘖期)至成熟期，晴天或多云天气的每日 9:00—18:00 排放臭氧，阴雨天气停止排放。

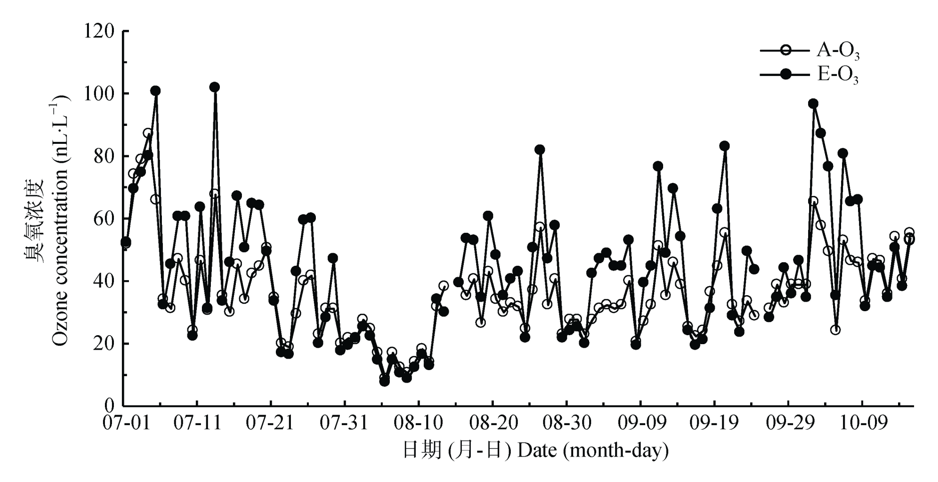


图 1　臭氧熏气期间日 9 h(9:00—18:00)平均臭氧浓度的变化

Fig. 1　Changes of day time 9 h (9:00—18:00) mean O_3 concentration during O_3 fumigation

$E\text{-}O_3$：高臭氧浓度；$A\text{-}O_3$：大气背景臭氧浓度。下同。$E\text{-}O_3$: elevated ozone concentration; $A\text{-}O_3$: ambient ozone concentration. The same below.

1.2　材料培育

供试品种为全生育期和主要生育期较为接近的常规粳稻'武粳 15'和杂交粳稻'陵风优 18'。大田旱育秧，5 月 22 日播种，6 月 17 日移栽；行距为 25 cm，株距为 16.7 cm，'武粳 15'每穴 3 苗，'陵风优 18'每穴 1 苗。总施氮量为 20 $g\cdot m^{-2}$，其中 6 月 17 日施基肥(占总施氮量的 60%)，8 月 1 日施穗肥(占总施氮量的 40%)。磷、钾肥均作为基肥全部施用。施磷、钾量均为 7 $g\cdot m^{-2}$。水分管理为 6 月 18 日—7 月 18 日保持浅水层(约 5 cm)，7 月 4 日—8 月 5 日进行多次轻搁田，8 月 6 日以后间隙灌溉，抽穗扬花期保持浅水，收获前 10 日断水。适时进行病虫草害防治，保证水稻正常生长发育。

1.3　测定内容和方法

成熟期连续收获 50 穴(平常不做扰动)，脱粒，测实际产量，再从中取 300 g 用网袋装好悬挂在实验室 3 个月，试验前 1 周将样品挂在干燥通风的实验室，使样品水分保持在 13%±1%。将供试稻谷统一用 NP-4350 型风选机去除空瘪粒，按中华人民共和国优质稻谷 GB1350—1999 标注进行测定。

使用出糙机(OHYA-25，日本)，将 100 g 稻谷出糙，而后用 CPC-3 型精米机将 60 g 糙米精加工约 1.2 min，去除皮层和胚。将出精后的精米，挑出长度仍达水稻完整精米粒平均长度 2/3 以上(含 2/3)的米粒，获得整精米，据此分别计算糙米率、精米率和整精米率。从整精米样品中随机取出 100 粒，置于垩白仪上，拣出有垩白(包括心白、腹白、背白)的米粒，从而算出垩白米率。随机取垩白米 10 粒，在垩白仪上平放，逐粒目测垩白面积占整个籽粒面积的百分数，求出垩白面积的平均值，从而获得垩白面积。将垩

白米率与垩白面积相乘，即可算得垩白度。

直链淀粉含量、胶稠度分别按中华人民共和国优质稻谷 GB/T15683—1995、GB/T17891—1999 标准进行测定。胶稠度采用胶质延伸法，以毫米度量米胶冷却后的长度。直链淀粉含量采用碘蓝比色法测定[27]。糊化温度采用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产的 3-D 型黏度速测仪，与稻米淀粉黏滞性谱(RVA 谱)[27]同时进行测定。

蛋白质浓度以精米为测试样，用 1241 型近红外快速品质分析仪(瑞典 Foss Tecator 公司)测定，测定精米的量不可少于 20 g，不可多于 65 g。

1.4 统计分析方法

本试验所有数据均以 Microsoft Excel 2013 进行处理和图表绘制。以 SPSS 22.0 进行方差分析，采用一般线性模型，各处理的比较均采用最小显著差法(LSD)。显著水平设 $P<0.01$、$P<0.05$、$P<0.1$ 和 $P>0.1$，分别用**、*、+和 ns 表示。

2 结果与分析

2.1 臭氧浓度增加对稻米加工品质的影响

稻谷糙米率指糙米重占稻谷重的百分率，该参数对高臭氧浓度的响应示于图 2a。‘武粳 15’、‘陵风优 18’的糙米率平均分别为 84.9%和 83.5%，差异达极显著水平。臭氧处理及其与品种的互作对稻谷糙米率均无显著影响。

精米率指糙米碾磨成精米时精米重占稻谷重的百分率。由图 2b 可知，‘武粳 15’、‘陵风优 18’的精米率平均分别为 75.9%和 75.6%，两者无显著差异。与对照相比，高臭氧浓度使两品种的精米率平均下降 0.54%(P=0.03)，其中‘武粳 15’、‘陵风优 18’分别下降 0.83%(P=0.04)和 0.25%(P=0.07)。臭氧与品种的互作对水稻精米率无显著影响。

整精米率即整精米数占精米数的百分率。由图 2c 可知，‘武粳 15’、‘陵风优 18’的整精米率平均值分别为 73.1%和 72.5%，两者无显著差异。臭氧处理及其与品种的互作对水稻整精米率均无显著影响。

2.2 臭氧浓度增加对稻米外观品质的影响

稻米垩白米率是指垩白米粒占全部样品米粒的百分数。由图 3a 可知，‘武粳 15’、‘陵风优 18’垩白米率平均分别为 47.7%和 39.6%，前者较后者增加 20.6%，差异达显著水平。臭氧处理及其与品种的互作对稻米垩白米率均无显著影响。

垩白大小指米粒垩白面积占整粒米投影面积的百分率。由图 3b 可知，‘武粳 15’、‘陵风优 18’垩白大小平均分别为 32.3%和 26.2%，两者无显著差异。

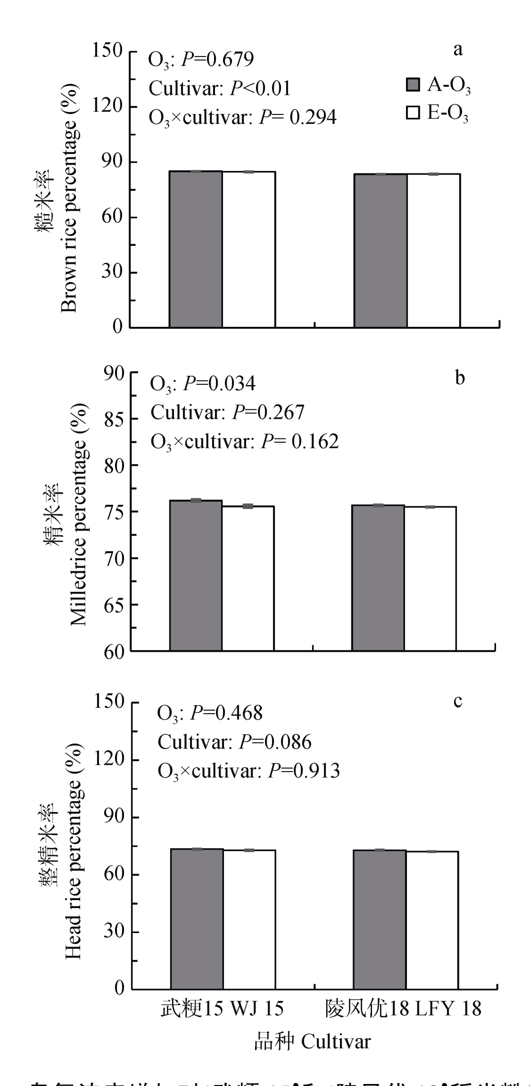


图 2 臭氧浓度增加对‘武粳 15’和‘陵风优 18’稻米糙米率(a)、精米率(b)和整精米率(c)的影响

Fig. 2 Effect of elevated O_3 concentration on brown rice percentage (a), milled rice percentage (b) and head rice percentage (c) of ‘Wujing15’ (WJ15) and ‘Lingfengyou18’ (LFY18)

ns：差异不显著; +: $P<0.1$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$。下同。 ns: no significant. +: $P < 0.1$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. The same below.

与对照相比，高臭氧浓度使两品种稻米垩白大小平均增加 42.0%(P=0.03)，其中‘武粳 15’、‘陵风优 18’分别增加 40.1%和 44.3%，分别达 0.1 和 0.01 显著水平。臭氧与品种的互作对稻米垩白大小无显著影响。

垩白度指垩白米的垩白面积占样品米粒总面积的百分比。由图 3c 可知，‘武粳 15’、‘陵风优 18’垩白度分别为 15.9%和 10.6%，前者较后者增加 49.9%，差异达显著水平。与对照相比，高臭氧浓度使两品种垩白度平均增加 60.5%(P=0.04)，其中‘武粳 15’、‘陵风优 18’分别增加 62.4%和 57.8%，分别达 0.1 和 0.05 显著水平。臭氧与品种的互作对稻米垩白度无显著影响。

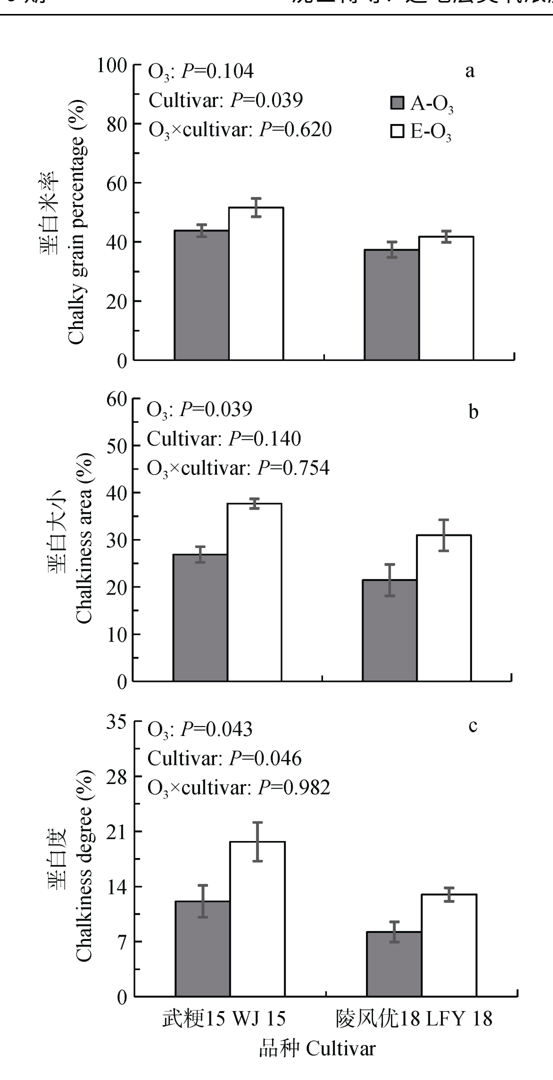


图 3　臭氧浓度增加对'武粳 15'和'陵风优 18'稻米垩白米率(a)、垩白大小(b)和垩白度(c)的影响

Fig. 3　Effect of elevated O_3 concentration on chalky grain percentage (a), chalkiness area (b) and chalkiness degree (c) of 'Wujing15' (WJ15) and 'Lingfengyou18' (LFY18)

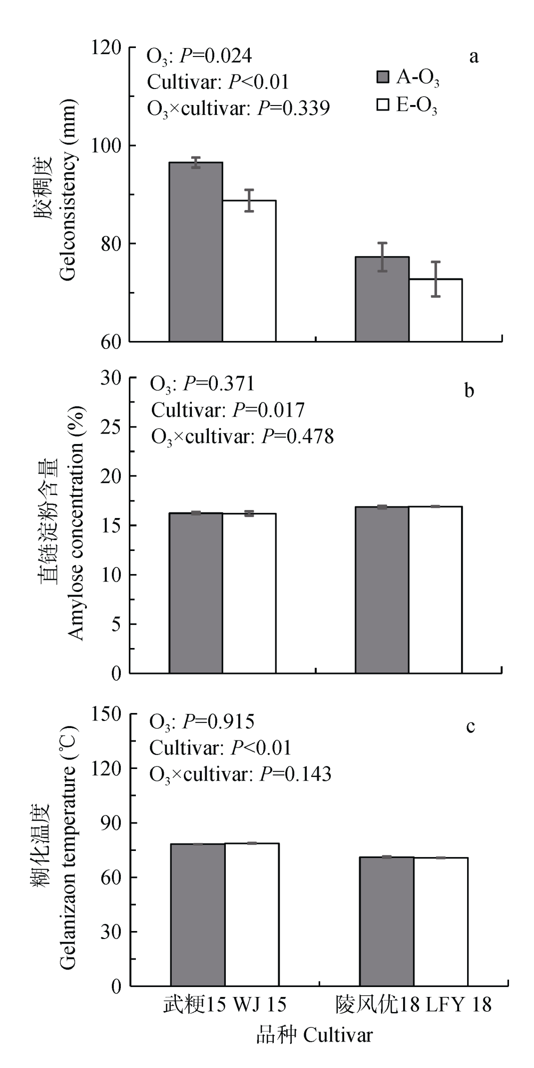


图 4　臭氧浓度增加对'武粳 15'和'陵风优 18'稻米胶稠度(a)、直链淀粉含量(b)和糊化温度(c)的影响

Fig. 4　Effect of elevated O_3 concentration on gelconsistency (a), amylose concentration (b) and gelanizaon temperature (c) of 'Wujing15' (WJ15) and 'Lingfengyou18' (LFY18)

2.3　臭氧浓度增加对稻米蒸煮/食味品质的影响

胶稠度指米胶胚乳中米胶的黏稠度，它反映了水稻淀粉米胶冷却后的延展性。由图 4a 可知，'武粳 15'、'陵风优 18'的稻米胶稠度平均分别为 92.6 mm 和 75.0 mm，前者较后者增加 19.0%，差异达极显著水平。与对照相比，高臭氧浓度使两品种的胶稠度平均分别降低 7.1%，达显著水平。从不同品种看，臭氧胁迫使'武粳 15'、'陵风优 18'分别下降 8.0%和 5.8%，前者达显著水平。方差分析表明，臭氧与品种的互作对稻米胶稠度无显著影响。

直链淀粉含量的高低直接影响米饭的理化特性和食味。由图 4b 可知，'武粳 15'、'陵风优 18'稻米直链淀粉含量平均分别为 16.2%和 16.9%，前者较后者下降 4.1%，两者差异达显著水平。臭氧处理及其与品种的互作对稻米直链淀粉含量亦无显著影响。

糊化温度指稻米的淀粉粒在热水中吸水，并发生不可逆转的膨胀时的温度。由图 4c 可知，'武粳 15'、'陵风优 18'的平均糊化温度分别为 78.5 ℃和 70.9 ℃，前者较后者提高 9.6%，差异达极显著水平。臭氧处理及其与品种的互作对稻米糊化温度的影响均未达显著水平。

2.4　臭氧浓度增加对稻米蛋白质浓度的影响

蛋白质浓度是稻米营养品质的重要指标，也是稻米胚乳的主要成分之一。由图 5 可知，'武粳 15'、'陵风优 18'的平均蛋白质浓度分别为 7.7 $mg\cdot g^{-1}$ 和 8.0 $mg\cdot g^{-1}$，两者无显著差异。臭氧处理及其与品种的互作对稻米蛋白质浓度均影响不显著。

2.5　臭氧浓度增加对稻米 RVA 谱的影响

RVA(rapid visco-analyser)可对稻米淀粉匀浆在加热、持续高温和冷却过程中的黏滞力加以测定，

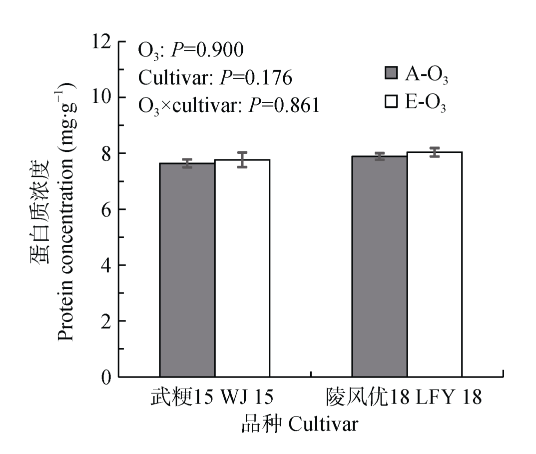


图 5 臭氧浓度增加对'武粳 15'和'陵风优 18'稻米蛋白质浓度的影响

Fig. 5 Effect of elevated O_3 on protein concentration of 'Wujing15' (WJ15) and 'Lingfengyou18' (LFY18)

不同的品种可获得不同的淀粉黏滞性谱，即 RVA 谱。由图 6 可知，热浆黏度值、崩解值、冷胶黏度值、消减值和回复值等 RVA 参数存在明显的品种间差异。与对照相比，高臭氧浓度使热浆黏度值显著增加，而最高黏度值、冷胶黏度值、消减值、回复值、崩解值变化幅度较小，均未达显著水平。方差分析表明，臭氧与品种的互作对所有 RVA 谱参数均无显著影响。

3 讨论与结论

稻米的加工品质指标包括糙米率、精米率和整精米率。前人研究表明，臭氧浓度增加 25%使杂交籼稻'汕优 63'出糙率和精米率均呈一致的下降趋势，尽管降幅较少[17–18]。本研究设置相同的臭氧浓度，结果发现臭氧处理对常规粳稻'武粳 15'和杂交粳稻'陵风优 18'糙米率均无显著影响，但使精米率显著下降，两品种趋势基本一致。相似地，本试验臭氧胁迫亦导致两品种整精米率均呈一致的下降趋势，尽管未达显著水平。结合前期研究可知，臭氧熏蒸后的稻谷经碾磨后将去除更高比例的外层。

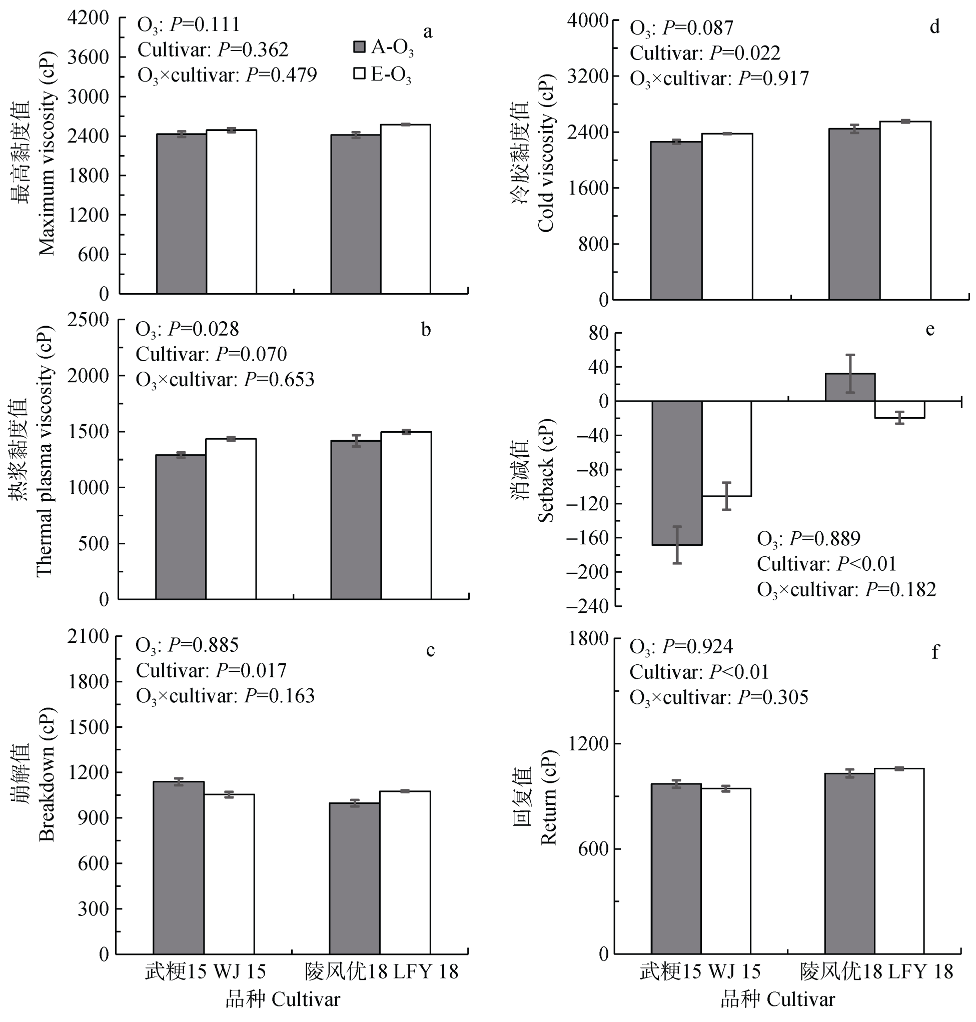


图 6 臭氧浓度增加对'武粳 15'和'陵风优 18'稻米最高黏度值(a)、热浆黏度值(b)、崩解值(c)、冷胶黏度值(d)、消减值(e)和回复值(f)的影响

Fig. 6 Effect of elevated O_3 concentration on maximum viscosity (a), thermal plasma viscosity (b), breakdown (c), cold viscosity (d), setback (e) and return (f) of 'Wujing15' (WJ15) and 'Lingfengyou18' (LFY18)

与大多数其他谷类不同，水稻籽粒的外观品质特别是垩白是市场上重要的品质指标，因为稻米通常不经过碾磨，而是以整个籽粒来消费的。垩白是稻米品质对环境变化反应最敏感的性状[28]。前期研究发现，臭氧浓度增加 25%使杂交籼稻'汕优 63'垩白明显增加，其中气室研究[18]中垩白米率、垩白度和垩白大小平均分别增加 39%、56%和 114%，但在 FACE 研究[17]中只有垩白米率显著增加。本研究表明，与 Ambient 相比，臭氧胁迫使两品种稻米垩白米率、垩白大小和垩白度平均分别增加 15%、42%和 61%，后两者均达显著水平。从水稻对其他逆境如高温的研究中发现，垩白增加可能是由于淀粉粒充实不良所致，而后者可能与逆境条件下植株早衰和灌浆时间缩短有关[12,22,29]。臭氧熏蒸稻米垩白较多，在加工过程中容易形成碎米，因此臭氧熏蒸使稻米的加工品质下降和垩白增加实际上是互为关联的[30]。臭氧胁迫导致的这种变化将直接影响稻米的商品价值和农民的收益。

稻米蒸煮/食味品质一般通过测定稻米的理化性质进行间接评价。前期研究表明，臭氧胁迫使'汕优 63'直链淀粉含量、胶稠度均无显著影响，但从淀粉黏滞性谱(RVA 谱)[17–18]和食味计测定结果[15]看，臭氧胁迫将导致稻米黏性减小，食味品质(适口性)变差。本研究表明，同样的臭氧处理对两粳型水稻品种直链淀粉含量无显著影响，与'汕优 63'的响应一致[17–18]。不同的是，本研究发现，臭氧胁迫使米粉的胶稠度显著下降(–7.1%)，但 RVA 谱除热浆黏度值外的所有参数包括崩解值、消减值以及糊化温度无显著变化，两品种趋势一致。这种差异可能与供试品种不同有关：本试验采用粳型品种，而前期研究的是籼型水稻[17–18]。胶稠度反映稻米淀粉胶的一种胶体特性，与米饭柔性有直接联系。臭氧处理导致稻米胶稠度显著下降，表明在臭氧胁迫环境下生长的水稻其米质可能变硬，这与宋琪玲等[15]利用物性分析仪对粳米的测定结果相一致。

蛋白质浓度是稻米营养品质的重要指标，对米饭的食味品质也有很大影响。与其他作物一致[9]，气室研究发现，臭氧胁迫使稻米蛋白质浓度显著增加，增幅因臭氧浓度[13–14]和供试品种而异[14]。中国 FACE 研究亦发现臭氧胁迫使籼稻'汕优 63'稻米蛋白质浓度平均增加约 10%[16–18]，这一结果亦与前期报道的该品种臭氧熏蒸稻米蒸煮后变硬且食味变劣相对应[15,17–18]。本研究表明，臭氧胁迫使两粳型品种稻米蛋白质浓度呈增加趋势，但均未达显著水平，这也与本研究观察到的稻米 RVA 谱无显著响应相一致。可见尽管臭氧胁迫下稻米蛋白质浓度均呈增加趋势，但这种增幅品种间可能存在很大差异。一般认为，臭氧熏蒸稻米蛋白浓度增加与"浓缩效应"有关，即碳代谢途径受臭氧胁迫的影响可能大于氮代谢[9]，但最新研究表明，臭氧胁迫导致元素浓度的改变，除了与"浓缩"效应有关外，可能还与其他因子(如蒸腾作用和根系生长等)的变化相关联。

本研究表明，尽管两个供试品种稻米诸品质性状多存在明显差异，但品种与臭氧的互作对所有测定指标均无显著影响，说明臭氧胁迫对'武粳 15'和'陵风优 18'稻米品质的影响趋势一致，即适度臭氧胁迫使稻米垩白明显增加，胶调度显著下降，但对其他稻米品质指标影响较小。由于本试验只有两个品种，因此所获结果的普遍性还需更多品种试验的验证。另外，近期 FACE 研究发现，栽培调控可在一定程度上减少臭氧胁迫对水稻生长和产量的影响[23–25]，但对稻米不同品质指标的响应有何影响尚待探明。明确这一问题对高臭氧浓度环境下制订稻作生产的适应策略以最小化臭氧伤害具有重要意义。

致谢　中国科学院南京土壤研究所刘钢和唐昊冶老师对臭氧 FACE 系统的日常维持，为本试验顺利实施提供了硬件保障，特此感谢。

参考文献 References

[1] Fowler D, Amann M, Anderson F, et al. Ground-level Ozone in the 21st Century: Future Trends, Impacts and Policy Implications[M]. London: The Royal Society, 2008

[2] Xing J, Wang S X, Chatani S, et al. Projections of air pollutant emissions and its impacts on regional air quality in China in 2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(7): 3119–3136

[3] Lal D M, Ghude S D, Patil S D, et al. Tropospheric ozone and aerosol long-term trends over the Indo-Gangetic Plain (IGP), India[J]. Atmospheric Research, 2012, 116: 82–92

[4] Liu Q, Lam K S, Jiang F, et al. A numerical study of the impact of climate and emission changes on surface ozone over South China in autumn time in 2000–2050[J]. Atmospheric Environment, 2013, 76: 227–237

[5] Wang Y X, Shen L L, Wu S L, et al. Sensitivity of surface ozone over China to 2000–2050 global changes of climate and emissions[J]. Atmospheric Environment, 2013, 75: 374–382

[6] Feng Z Z, Kobayashi K. Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(8): 1510–1519

[7] Ainsworth E A, McGrath J M. Direct effects of rising atmospheric carbon dioxide and ozone on crop yields[M]//

Lobell D, Burke M. Climate Change and Food Security: Advances in Global Change Research. Germany Springer Netherlands, 2010, 37: 109–130
[8] 杨连新, 王云霞, 赵秩鹏, 等. 自由空气中臭氧浓度升高对大豆的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6635–6645
Yang L X, Wang Y X, Zhao Y P, et al. Responses of soybean to free-air ozone concentration enrichment: A research review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6635–6645
[9] Wang Y X, Frei M. Stressed food — The impact of abiotic environmental stresses on crop quality[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(3/4): 271–286
[10] Timmer C P, Block S, Dawe D. Long-run dynamics of rice consumption, 1960–2050[M]//Pandey S, Byerlee D, Dawe D, et al. Rice in the Global Economy: Strategic Research and Policy Issues for Food Security. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2010: 139–174
[11] Lal R. Food security in a changing climate[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2013, 13: 8–21
[12] 杨连新, 王余龙, 石广跃, 等. 近地层高臭氧浓度对水稻生长发育影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 901–910
Yang L X, Wang Y L, Shi G Y, et al. Responses of rice growth and development to elevated near-surface layer ozone (O_3) concentration: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 901–910
[13] 郭建平, 王春乙, 温民, 等. 大气中 O_3 浓度变化对水稻影响的试验研究[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 822–826
Guo J P, Wang C Y, Wen M, et al. The experimental study on the impact of atmospheric O_3 variation on rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(6): 822–826
[14] Frei M, Kohno Y, Tietze S, et al. The response of rice grain quality to ozone exposure during growth depends on ozone level and genotype[J]. Environmental Pollution, 2012, 163: 199–206
[15] 宋琪玲, 齐义涛, 赵轶鹏, 等. 自由空气中臭氧浓度升高对'武运粳 21'稻米物性及食味品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 566–571
Song Q L, Qi Y T, Zhao Y P, et al. Impact of free air ozone concentration enrichment on cooked rice (Wuyunjing 21) texture and palatability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 566–571
[16] Zhou X D, Zhou J, Wang Y X, et al. Elevated tropospheric ozone increased grain protein and amino acid content of a hybrid rice without manipulation by planting density[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(1): 72–78
[17] Wang Y X, Yang L X, Han Y, et al. The impact of elevated tropospheric ozone on grain quality of hybrid rice: A free-air gas concentration enrichment (FACE) experiment[J]. Field Crops Research, 2012, 129: 81–89
[18] Wang Y X, Song Q L, Frei M, et al. Effects of elevated ozone, carbon dioxide, and the combination of both on the grain quality of Chinese hybrid rice[J]. Environmental Pollution, 2014, 189: 9–17
[19] Broberg M C, Feng Z Z, Xin Y, et al. Ozone effects on wheat grain quality — A summary[J]. Environmental Pollution, 2015, 197: 203–213
[20] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO_2 concentrations[J]. Science, 2006, 312(5782): 1918–1921
[21] Tang H Y, Liu G, Han Y, et al. A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: control performance and ozone exposure regime[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(35): 6276–6282
[22] Shi G Y, Yang L X, Wang Y X, et al. Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(3/4): 178–184
[23] 罗克菊, 朱建国, 刘钢, 等. 臭氧胁迫对水稻的光合损伤与施氮的缓解作用[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 481–488
Luo K J, Zhu J G, Liu G, et al. Effects of elevated ozone on leaf photosynthesis of rice (*Oryza sativa* L.) and mitigation with high nitrogen supply[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 481–488
[24] 彭斌, 李潘林, 周楠, 等. 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3668–3675
Peng B, Li P L, Zhou N, et al. Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3668–3675
[25] 彭斌, 赖上坤, 李潘林, 等. 臭氧与栽插密度互作对扬稻 6 号生长发育和产量形成的影响——FACE 研究[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(4): 401–410
Peng B, Lai S K, Li P L, et al. Interactive effects of ozone concentration and planting density on growth, development and yield formation of Yangdao 6 — A FACE study[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2014, 28(4): 401–410
[26] 余永昌, 林先贵, 冯有智, 等. 近地层臭氧浓度升高对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1227–1234
Yu Y C, Lin X G, Feng Y Z, et al. Effects of elevated surface O_3 concentration on functional diversity of soil microbial community in rice field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1227–1234
[27] 国家质量技术监督局. GB/T 17891—1999 优质稻谷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000
Supervising Department of Quality and Technology of China. GB/T 17891—1999 High Quality Paddy[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2000
[28] Fitzgerald M A, Resurrection A P. Maintaining the yield of edible rice in a warming world[J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(12): 1037–1045
[29] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, et al. The impact of free-air CO_2 enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. Field Crops Research, 2007, 102(2): 128–140
[30] Juliano B O, Oñate L U, Del Mundo A M. Relation of starch composition, protein content, and gelatinization temperature to cooking and eating qualities of milled rice[J]. Food Technology, 1965, 19(6): 116–121